

シリーズ： はやぶさ2 # トリフネ・フライバイに寄せて
「トリフネへの軌道設計、フライバイ観測、そして地球防衛へ」

JAXA 宇宙科学研究所
元はやぶさ2 プロジェクトエンジニア 佐伯 孝尚
元はやぶさ2 ミッションマネージャ 吉川 真
Georgia Institute of Technology
はやぶさ2 拡張ミッション統合サイエンスチーム PI Masatoshi Hirabayashi

■探査機には長生きをしてほしい

初代はやぶさは、地球帰還時、カプセル分離後に再離脱するための燃料が残っておらず、カプセルとともに地球へ突入した。当時まだ若手研究者であった佐伯は、小惑星イトカワから帰還した探査機と運用チームに大きな感銘を受ける一方、その最期に寂しさも感じた。探査機には少しでも長生きしてほしい。太陽系探査に関わる多くの人が、同じ思いを抱いたのではないだろうか。

そのような経験もあってか、はやぶさ2では、すべてがうまくいけば、地球帰還後に拡張ミッションを行うことはチームの共通認識であった。佐伯が拡張ミッションを強く意識するようになったのは、2回目のタッチダウンが無事に成功し、地球帰還が現実的に見えてきた2019年夏のことであった。

■とりあえず行ける天体を探してみる

最初は、拡張ミッションの意味を深く考えず、はやぶさ2が到達できる天体を探し始めた。新しいミッションでは、行きたい天体を決め、そこに届く探査機と軌道を設計する。しかし拡張ミッションでは順序が逆になる。すでに飛行中の探査機的能力や残存資源、地球帰還時の軌道から、行ける天体を探さなければならない。

特に、カプセルをオーストラリアへ正確に帰還させるため、はやぶさ2の地球再出発軌道にはほとんど自由度がなかった。そのため、次の天体との会合条件を作るには、地球スイングバイまで長い時間をかける必要があった。

多くの試行錯誤の結果、地球を2回スイングバイし、小惑星1998 KY26にランデブする軌道が導き出された。最終天体への到着まで11年を超える長期計画であった。

■え？ 地球防衛？

その頃、拡張ミッションを実施するには、より明確な意義が必要だという議論があり、「地球防衛（プラネタリーディフェンス）」という新たなテーマが設定された。[藤本所長と津田副所長のエッセイ](#)では、その言葉を聞いたとき、佐伯の頭の中が真っ白になったと紹介されている。何も考えられなくなったというより、問題の意味が一瞬で書き換えられた感覚に近かった。

それまでの課題は、「地球帰還後も飛行可能な軌道を探すこと」であった。それが、「地球防衛という意味を持つ飛行を、残された探査機で実現すること」に変わった。単にどこか

の天体へ行くのではなく、飛び方そのものに意味を持たせる必要が生じたのである。そこで、最初の地球スイングバイまでの間に、小惑星 2001 CC21、現在のトリフネを高速でフライバイする計画が加えられた。高速で接近する小天体を発見し、軌道を決定し、探査機をその近傍へ正確に導くことは、将来の地球防衛にも通じる。

推力の小さなイオンエンジンで、姿勢や撮像条件を満たしながらトリフネへ立ち寄る軌道を作ることは容易ではなかった。しかも、その検討は地球帰還の準備と並行して行われた。それでも、チームやメーカーの軌道計画担当者の努力によって、計画は実現へ向かっていった。拡張ミッションは、はやぶさ 2 の設計寿命を超えて実施されている。運用を引き継いだ若手チームが探査機を大切に扱ってきたことが、今回のトリフネ超近接フライバイの成功につながったのだと思う。本ミッションを終えた後も新しい挑戦を続けるはやぶさ 2 には、少しでも長生きしてほしいと、改めて感じている。

■トリフネをどのように観測するか？

トリフネへの軌道が計画されてからフライバイまで、はやぶさ 2 拡張ミッションチーム（はやぶさ 2 # チーム）はトリフネをどのように観測するかという難題への最適解を見つけることに躍起になっていた。理学観測が主な目標である一方、工学的制約も考慮した総合的な議論が必要であることから、フライバイ理学観測計画は理学と工学のメンバーが集まってできたワーキンググループ（通称、トリフネフライバイ WG）で行われていた。ワーキンググループのメンバーとして Hirabayashi も議論や解析に貢献してきた。

フライバイ案が数多く提案される中、最終案としてトリフネフライバイ WG が探査機姿勢と軌道進入方向（トリフネをどの方向から見るか）そしてフライバイ時間（トリフネをいつ見るか）を決定するということに落ち着いた。当初は様々な意見が飛び交っていた。ブレインストーミング的な意味合いもあるが明確な接点が見えない。例えば、ある機器はある条件で観測をしたいが、別の機器では別の条件で観測を行いたいと、いろいろな場面で条件が噛み合わない。

■理工学での詳細な議論

議論を度重ねることによって、理工メンバーがトリフネフライバイ WG で一つなる。探査機搭載の全ての理学機器でトリフネを理学観測することで合意したのである。ただ、これが非常に厄介であった。望遠の光学航法カメラ（ONC-T）と中間赤外カメラ（TIR）は比較的画角が大きい一方、できるだけ高解像度な画像が欲しい。このため近傍での撮像を要求する。一方、近赤外分光計（NIRS3）とレーザ高度計（LIDAR）は画角が TIR や ONC-T のそれとは比較にならないほど小さく、少し姿勢のズレですぐに天体が画角内からはずれてしまう。また、LIDAR は天体までの距離にも大きな制限があり、トリフネの場合には数十 km 程度以下でしか天体を捉えることができない。約 2 年の解析を経て、天体をフライバイする 2-4 秒前に全ての理学機器で観測できるような探査機姿勢を見つけ出すことができた。また、この姿勢を実現するためにフライバイ 5 分前にこの姿勢に移行するということで理学と工学のメンバーが合意したのである。

■2秒の壁

LIDAR と NIRS3 について問題点は観測時間の短さにある。どんなにいい条件を与えても

最長の観測時間は2秒以内。LIDARは毎秒1回でデータを取得しているため、うまくいったとしても最大2回だけしか観測データを取得することができない。フライバイ前の数週間にわたる議論の末、フライバイ後真っ先に探査機からLIDARとNIRS3のデータを下ろしてトリフネをきちんととらえられているか確認することで合意した。実際、フライバイ後にははやぶさ2チームのメンバーの多くが管制室でフライバイ成功を祝ったが、トリフネフライバイWGのメンバーの多くはデータを早く見たいという一心であった。もしデータが得られていれば、小惑星を狙った高速フライバイでのデータ取得（特にLIDARデータの取得）成功という快挙となるだけでなく、後から降りてくるTIRとONC-Tのデータにおいてもいい画像が得られていると確信できることになる。

■トリフネ観測成功！

トリフネフライバイWG一同が観測用モニターに釘付けになっていた時、LIDARからデータが下りてきた。データを一心不乱に探すと、何やら受かったらしいデータがある。ただそれだけでは完全に確認できたわけではない。データ取得時刻が予測時刻と整合する必要がある。データ取得時刻が読み上げられたとき、割れんばかりの歓喜で溢れかえった。管制室でフライバイ成功の集合写真を撮ってから約15分後のことである。涙が溢れでてきた場面である。2秒間の観測機会中にLIDARが2点、そしてNIRS3は10点ほどデータを取得することができた。続いて、ONC画像、そしてTIR画像。この時点では、予想を遥か超えた画像ばかりで歓喜を通り越して空いた口が塞がらなかった。全ての機器でトリフネを確認したのだ。ミッションとしてデータ取得が重要課題であったが、フライバイを改めて見返すと、最も貴重なことは理工チームが一丸となり2秒の壁を越える挑戦の中でできたチームメンバーの強い絆であると言える。

■はやぶさ2の立ち上げ

以上のようにトリフネフライバイが大成功した今、改めてはやぶさ2の立ち上げを振り返ってみたい。2005年末、小惑星イトカワからのサンプルリターンに挑戦していた初代はやぶさは、燃料漏れや通信途絶など、大変な状況に陥っており、地球帰還が危ぶまれていた。さらには、サンプル採取も予定通りには行われていないこともわかった。それで、はやぶさの運用は行いつつ、再挑戦のミッションとしてはやぶさ2を2006年に提案したのである。吉川は、このはやぶさ2立ち上げの時の取りまとめ役を任されていた。

ただし、毎年提案をしても却下された。その理由の一つとして、単にはやぶさを改良しただけでは、新規性がないということがあった。そこで、当時、はやぶさプロジェクトマネージャの川口淳一郎先生を中心として、壮大な提案をした。それは、2機の探査機をH-IIAロケットと一緒に打ち上げて、片方がはやぶさ2として先にリュウグウに到着して探査を行い、その後でもう一機の「衝突機」をリュウグウに衝突させてその様子を観測した上で、人工的に作られたクレーターにもタッチダウンしてサンプルを採取しようという案である。これは、まさに現在、NASAのDARTとESAのHeraが現在行っているミッションとほぼ同等な（あるいはそれ以上の）アイディアのものである。新規性満載のミッション提案であったが、コストが高すぎるということで、やはり却下になってしまった。その代わり、はやぶさ2には小型の衝突装置（SCI：Small Carry-on Impactor）が搭載されることになるのだが。

■20 年来（あるいは 35 年来）の悲願

はやぶさ 2 と衝突機の 2 機の探査機を打ち上げるというミッションは、まさにプラネタリーディフェンス（地球防衛）のミッションなのであるが、はやぶさ 2 の立ち上げを目指していた 2000 年代は、日本国内においては地球防衛の認知度が非常に低かった。ミッション提案の取りまとめ役として、はやぶさ 2 の目的に地球防衛（当時はスペースガードと呼ばれていた）を入れようとしたところ、天体の地球衝突などという非科学的なことは、はやぶさ 2 の目的に書くべきではないと言われた。それで、はやぶさ 2 のミッションの目的には、地球防衛は記載されていない。

それから約 20 年経った今、はやぶさ 2 の拡張ミッションでは、地球防衛が重要な目的の 1 つとして明記され、さらに小惑星トリフネの超近接フライバイに成功して、地球防衛にとって重要な小惑星の軌道変更のための技術を日本も獲得したと言えるところまで至った。これは非常に感慨深いことである。吉川がスペースガード（地球防衛）に関わり始めたのは 1990 年代の初めの頃である。その頃は、世界的に見ても地球防衛にあまり関心が持たれていなかったのであるが、それから 35 年、状況はかなり変化した。そして今後、2029 年の小惑星アポフィスの地球接近に向けて、地球防衛への関心はますます高まると思われる。はやぶさ 2 には、地球防衛の目的の締めくくりとなる 2031 年の 1998 KY26 ランデブまで、是非とも達成してもらいたい。